

PERANCANGAN PARAMETER PADA MOTOR INDUKSI TIGA FASA TIPE ROTOR BELITAN UNTUK PENINGKATAN UNJUK KERJA

Tejo Sukmadi

Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro
Jalan Prof. Sudharto, SH – Tembalang, Semarang, Jawa Tengah
e-Mail : tejosukmadi@gmail.com

Abstrak

Motor listrik tidak dapat dipisahkan dari dunia industri. Paling banyak dijumpai adalah motor induksi tiga fasa. Salah satu jenis motor induksi tiga fasa adalah tipe rotor belitan, dengan banyak kelebihan diantaranya konstruksi yang sederhana dan perawatan yang mudah. Diperlukan perancangan parameter mesin yang optimal untuk mendapatkan unjuk kerja yang bagus yang dilihat melalui peningkatan nilai efisiensi dan pengurangan rugi-rugi daya. Proses perancangan dilakukan melalui berbagai tahapan dengan perhitungan parameter mesin.

Kata kunci: Perancangan parameter, motor induksi tiga fasa, unjuk kerja.

PENDAHULUAN

Motor listrik adalah peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik (Wildi, 2000) ^[1]. Sebagai salah satu upaya untuk meningkatkan unjuk kerja dari motor induksi tiga fasa jenis rotor belitan adalah dengan meningkatkan nilai efisiensi dan mengurangi rugi-rugi daya.

Konsep pemikiran mengenai perancangan parameter mesin listrik adalah berdasarkan pada standar seperti NEMA, IEEE 841 serta NEMA EPACT tentang perancangan motor induksi tiga fasa (Johny, 2005) ^[2].

Tulisan ini dimaksudkan untuk menunjukkan proses perancangan parameter pada motor induksi tiga fasa jenis rotor belitan melalui peningkatan nilai efisiensi dan pengurangan rugi-rugi daya.

DASAR TEORI

Umum (Fitzgerald, 1997) ^[3]

Motor arus bolak-balik (motor AC) adalah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik arus bolak-balik (listrik AC) menjadi tenaga gerak atau tenaga mekanik, dimana tenaga gerak itu berupa putaran dari pada rotor.

Dari segi hubungan putaran rotor dan frekuensi *fluks* magnet stator, motor AC dibedakan atas, pertama, motor *sinkron* (serempak), disebut demikian karena putaran motor sama dengan putaran *fluks* magnet stator, motor tidak dapat berputar sendiri meski lilitan stator telah dihubungkan dengan tegangan luar, agar bergerak perlu penggerak permulaan, umumnya menggunakan eksitasi. Kedua, motor *asinkron* (takserempak), disebut demikian karena putaran motor tidak sama dengan putaran *fluks* magnet stator. Dengan perkataan lain antara rotor dan *fluks*

magnet stator terdapat selisih perputaran yang disebut *slip*.

Sedangkan dari segi cara rotor menerima tegangan atau arus, ada dua jenis motor yaitu:

1. Motor yang rotornya menerima tegangan secara langsung
2. Motor induksi, penerimaan tegangan dan arus pada rotor dilakukan dengan jalan induksi. Jadi pada motor induksi, rotor tidak langsung menerima tegangan atau arus dari luar.

Konstruksi (Theraja, 1984) ^[4]

1. Konstruksi Stator

Stator adalah bagian yang diam dari motor. Stator tersusun dari kumpulan stator dan inti. Inti stator terbuat dari lapis-lapis plat baja beralur yang didukung dalam rangka stator yang terbuat dari besi tuang atau pelat baja yang dipabrikasi. Inti berfungsi sebagai dukungan mekanis sekaligus kanalisasi *fluks* magnet yang akan dihasilkan.

2. Konstruksi Rotor

Rotor terdiri dari tumpukan lempengan besi tipis yang dilaminasi dan batang konduktor yang mengitarinya. Tumpukan besi yang dilaminasi disatukan untuk membentuk inti rotor. Aluminium (sebagai batang konduktor) dimasukkan ke dalam slot dari inti rotor untuk membentuk serangkaian konduktor yang mengelilingi inti rotor. Arus yang akan mengalir melalui konduktor akan membentuk elektromagnet. Secara mekanik dan elektrik batang-batang konduktor disambungkan ke ujung cincin. Inti rotor diletakkan menempel ke as dari besi yang membentuk konstruksi rotor secara penuh.

Prinsip Kerja Motor Induksi Tiga fasa (Zuhail 2004) ^[5]

- a. Apabila sumber tegangan tiga fasa dipasang pada belitan stator maka akan timbul medan putar dengan kecepatan putar :

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

(2.1).

- b. Medan putar stator tersebut akan memotong batang-batang konduktor pada bagian rotor.
 c. Akibatnya pada bagian rotor akan timbul tegangan induksi (ggl).
 d. Karena pada rotor timbul tegangan induksi dan rotor merupakan rangkaian yang tertutup, sehingga pada rotor akan timbul arus (I).
 e. Adanya arus (I) didalam medan magnet, menurut kaidah tangan kanan akan timbul gaya (F) pada rotor.
 f. Apabila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (F) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
 g. Seperti telah dijelaskan pada nomor (3) tegangan induksi timbul karena terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dengan kecepatan berputar rotor (n_r).
 h. Perbedaan kecepatan antara n_s , dan n_r , disebut *slip* yang dinyatakan dengan :

$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100\% \quad (2.2)$$

PERANCANGAN (Upadhyay, 2002) ^[6]

Fitur Perancangan

Pada perancangan motor induksi tiga fasa jenis rotor belitan ini, parameter-parameter yang perlu diperhatikan dibagi menjadi 5 kategori yaitu :

- *Electrical design* : perhitungan komponen listrik seperti resistansi konduktor.
- *Magnetic design* : menentukan besarnya fluks magnet dan rapat fluks magnetik pada slot dan gerigi.
- *Insulation design* : menentukan kelas isolasi berdasarkan suhu kerja motor.
- *Thermal design* : liran panas dan pengaturan pendingin atau ventilasi.
- *Mechanical design* : perancangan mekanik.

Rumus Perancangan Yang Digunakan Perancangan Dimensi

Penentuan jumlah kutub mesin :

$$P = \frac{120 \cdot f}{N} \quad (3.1)$$

Penentuan diameter stator :

$$D = \sqrt[3]{\frac{Q \times P}{\pi \cdot C \cdot N \cdot \text{rasio pole pitch}}} \quad (3.2)$$

Penentuan panjang inti stator :

$$\tau_p = \frac{\pi D}{P} \quad (3.3)$$

Penentuan panjang celah udara (*airgap*) :

$$\delta = (0,2 + 2\sqrt{DL}) \quad (3.4)$$

Perancangan Stator

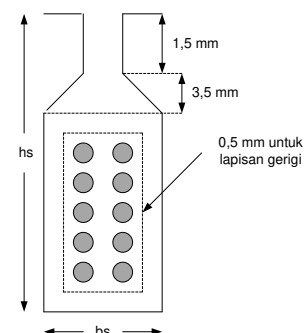
Perhitungan arus yang mengalir pada stator :

$$I_{ph} = \frac{Q (kw) \times 10^3}{3 V_{ph} \eta \cos \varphi} \quad (3.5)$$

Jumlah putaran lilitan per fasa stator :

$$N_{ph} = \frac{V_{ph}}{4,44 K_w f \phi_1} \quad (3.6)$$

Perhitungan *slot* stator dilakukan berdasarkan gambar (3.1) sebagai berikut :



Gambar 1. Konfigurasi *slot* stator

Ukuran *slot* terdiri dari :

- Panjang,

$$h_s = (n_{\text{ver}} \times D_1) + 0,5 + 0,5 + 3,5 + 1,5 \quad (3.7)$$

- Lebar,

$$b_s = (n_{\text{hor}} \times D_1) + 0,5 + 0,5 \quad (3.8)$$

Panjang putaran konduktor stator per fasa :

$$L_{mt} = 2 [L + 1,15 \tau_p + 0,08] \quad (3.9)$$

Resistansi konduktor per fasa :

$$R_{ph} = 1,15 \times 0,021 \times \frac{L_{mt} N_{ph}}{F_c \text{ (mm}^2\text{)}} \quad (3.10)$$

Rugi tembaga Stator :

$$3 I_{ph}^2 R_{ph} \quad (3.11)$$

Rugi besi pada gerigi dan gandar :

$$p_{it} \times 7600 \times b_t \times h_t \times L \times S_1 \quad (3.12)$$

Rugi besi pada gerigi stator :

$$p_{iy} \times 7600 \times \frac{\pi}{4} [D_0^2 - (D + 2h_t)]^2 \quad (3.13)$$

Perancangan rotor

Penentuan diameter rotor :

$$D_r = D - 2 \cdot \delta \quad (3.14)$$

Jumlah konduktor per *slot* :

$$N_{cr} = \frac{V_{2ph} \cdot N_{ph} \cdot 6}{V_{ph} \cdot S_2} \quad (3.15)$$

Jumlah total konduktor pada rotor :

$$Z_2 = S_2 \cdot N_{cr} \quad (3.16)$$

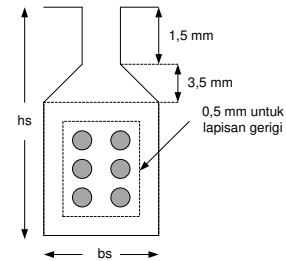
Jumlah konduktor tiap fasa :

$$Z_{2ph} = \frac{S_2 \cdot N_{cr}}{3} \quad (3.17)$$

Jumlah putaran lilitan per fasa rotor :

$$N_{2ph} = \frac{Z_{2ph}}{2} = \frac{S_2 \cdot N_{cr}}{6} \quad (3.18)$$

Perhitungan *slot* rotor berdasar gambar (3.2) sebagai berikut :



Gambar 2. Konfigurasi *slot* rotor

Ukuran *slot* terdiri dari :

- Panjang,

$$h_{sr} = (n_{\text{ver}} \times D_2) + 0,5 + 0,5 + 3,5 + 1,5 \quad (3.19)$$

- Lebar,

$$b_{sr} = (n_{\text{hor}} \times D_2) + 0,5 + 0,5 \quad (3.20)$$

Panjang Putaran konduktor rotor per fasa

Resistansi rotor per fasa :

$$R_{2ph} = 0,021 \times 1,12 \times \frac{N_{2ph} \times L_{mt_2}}{F_{c_2}} \quad (3.21)$$

Rugi tembaga pada rotor :

$$3 \cdot I_{2ph}^2 \cdot R_{2ph} \quad (3.22)$$

Perhitungan Efisiensi, Torsi Dan Suhu :

Efisiensi :

$$\frac{Q}{Q + \text{Rugi total}} \quad (3.23)$$

Torsi Maksimum :

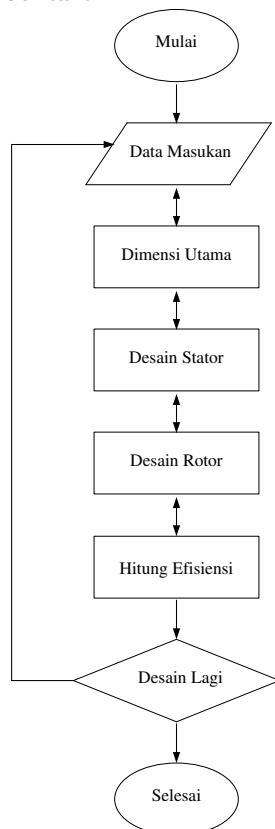
$$\frac{(3 V_{ph} I_{2ph} \cos \varphi \eta)}{V_p \cdot 60} \quad (3.24)$$

Suhu Kerja :

$$\frac{Rugi\ total}{(Luas\ mesin \times koef. transfer\ panas)} \quad (3.25)$$

Diagram Alir (Flow Chart)

Diagram alir berikut ini adalah menunjukkan proses perancangan parameter motor induksi tiga fasa tipe rotor belitan.



Gambar 3. Flow chart perancangan

IV HASIL PERANCANGAN

Spesifikasi :

- Kapasitas = 2 HP
- Tegangan Kerja = 460 Volt
- Frekuensi = 60 Hz
- Kecepatan = 3600 Rpm

Dimensi

Hubungan motor WYE-WYE

Jumlah kutub = 2

Rasio pole pitch = 1

Pole pitch = 0,203 m

Dia. bag dalam stator = 0,129 m

Panjang inti stator = 0,203 m

Kecepatan putar mesin = 0,407 m/s

Panjang celah udara = 0,525 mm

Stacking factor (Ki) = 0,9

Perhitungan panjang aktual besi :

- Panjang saluran ventilasi = 1 cm
- Jumlah saluran ventilasi = 2
- Lebar efektif sal. ventilasi = 0,208 cm
- Panjang besi total = 0,199 m
- Panjang besi efektif = 0,183 m
- Panjang aktual besi = 0,165 m

PERANCANGAN STATOR

Hubungan stator WYE

Tegangan per fasa stator = 265,589 Volt

Arus per fasa = 2,203 Ampere

Jumlah putaran per fasa = 86

Jumlah konduktor tiap fasa = 172

Total konduktor mesin = 516

Jumlah konduktor per slot :

- Jumlah slot per kutub tiap fasa = 3
- Jumlah total slot pada stator = 18
- Jumlah konduktor per slot = 29
- Jarak antar slot stator = 22,603 mm

Luas penampang konduktor = 0,595 mm²

Diameter konduktor = 0,871 mm

Perhitungan ukuran slot :

- Jumlah konduktor vertikal = 6
- Jumlah konduktor horizontal = 5
- Panjang slot = 11,226 mm
- Lebar slot = 5,535 mm
- Luas slot efektif = 60,107 mm²

Perhitungan ukuran gigi (teeth) :

- Panjang gigi = 11,225 mm
- Dia. bidang pada 1/3 ketinggian gigi = 137,094 mm
- Jarak slot pada 1/3 ketinggian gigi = 23,915 mm
- Lebar gigi 1/3 ketinggian gigi = 18,556 mm
- Luas bidang 1/3 ketinggian gigi = 9192,342 mm
- Fluks pada kutub = 0,0122 Wb
- Rapat fluks untuk 1/3 ketinggian gigi = 1,323 T

Perhitungan gandar stator :

- Rapat fluks pada gandar = 1,4 T
- Fluks pada gandar = 0,006 Wb
- Tinggi gandar = 26,310 mm

- Luas gandar = 4343,340 mm²
- Diameter frame yang digunakan = 204,643 mm

Perhitungan resistansi dan rugi-rugi :

- Panjang lintasan konduktor = 1,035 m
- Panjang konduktor per fasa = 88,988 m
- Resistansi konduktor per fasa = 3,515 ohm
- Rugi tembaga stator = 51,181 Watt
- Volume tembaga konduktor = 0,00016 m³
- Berat tembaga konduktor = 1,415 Kg
- Berat besi pada gandar = 8,554 kg
- Rugi besi pada gerigi stator = 10,860 Watt
- Rugi besi pada gandar stator = 76,983 watt

PERANCANGAN ROTOR

Hubungan rotor = WYE

Tegangan rotor = 240,841 Volt

Diameter rotor = 0,129 m

Perhitungan jumlah slot dan konduktor :

- Jumlah slot per kutub per fasa = 4
- Jumlah total slot pada rotor = 24
- Jarak antar slot rotor = 16,815 mm

Jumlah konduktor rotor per slot = 19

Total konduktor pada rotor = 456

Jumlah konduktor per fasa = 152

Jumlah putaran per fasa = 76

Arus yang mengalir pada rotor = 2,119 Ampere

Luas penampang konduktor = 0,573 mm²

Diameter konduktor = 0,854 mm

Perhitungan ukuran slot :

- Jumlah konduktor vertikal = 10
- Jumlah konduktor horizontal = 2
- Luas slot efektif
- Panjang slot = 14,541 mm
- Lebar slot = 2,708 mm
- Luas slot efektif = 39,382 mm²

Perhitungan ukuran gerigi :

- Jarak slot pada 1/3 ketinggian gerigi = 15,540 mm
- Lebar gerigi pada 1/3 ketinggian gerigi = 12,832 mm
- Luas bidang pada 1/3 ketinggian gerigi = 25421,020 mm²
- Rapat fluks pada 1/3 ketinggian gerigi = 1,314 T

Perhitungan ukuran gandar :

- Fluks pada gandar = 0,006 wb
- Tinggi gandar rotor = 26,310 mm
- Luas gandar rotor = 4343,340 mm²

Perhitungan rugi-rugi Rotor :

- Jarak antar koil rotor = 16,815 mm
 - Panjang lintasan konduktor = 0,697 m
 - Panjang konduktor lilitan per fasa = 52,995 m
 - Resistansi rotor per fasa = 2,176 ohm
 - Rugi tembaga pada rotor = 29,317 watt
- Berat tembaga pada rotor = 0,810 kg

PERHITUNGAN RUGI-RUGI DAYA DAN EFISIENSI :

Rugi tembaga pada stator = 51,181 watt

Rugi tembaga pada rotor = 29,317 watt

Rugi-rugi gesekan = 5,968 watt

Rugi besi total motor = 93,811 watt

Total rugi-rugi = 174,309 watt

Efisiensi mesin = 89,539 %

Slip motor = 1,927 %

Torsi maksimum = 52,637 N.m

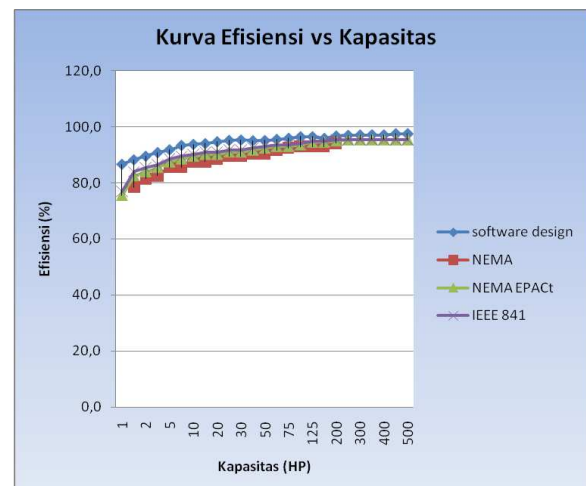
Suhu kerja motor = 50,949 °C

Kelas isolasi = Y

Setelah dilakukan pengujian untuk data yang lain maka diperoleh grafik perbandingan sebagai berikut :

KARAKTERISTIK MOTOR INDUKSI :

Perhitungan perancangan dilakukan pada nilai kapasitas motor yang lain. Seluruh hasil perhitungan akan menunjukkan karakteristik dari motor induksi yang bersangkutan.



Gambar 4. Efisiensi Sebagai Fungsi Kapasitas

Hasil perancangan menunjukkan motor mempunyai kecenderungan efisiensi yang meningkat sesuai peningkatan dari pada kapasitasnya.

Tabel 1. Perbandingan hasil perancangan dengan standar (NEMA) ^[7] pada berbagai nilai kapasitas motor

KAPASITAS (HP)	PERANCANGAN	NEMA	NEMA EPACT	IEEE 841
1	86,7		75,5	77,0
1,5	88,3	78,5	82,5	84,0
2	89,5	81,5	84,0	85,5
3	90,9	82,5	85,5	86,5
5	91,9	85,5	87,5	88,5
7,5	93,4	85,5	88,5	89,5
10	93,8	87,5	89,5	90,2
15	94,1	87,5	90,2	91,0
20	94,7	88,5	90,2	91,0
25	95,2	89,5	91,0	91,7
30		89,5	91,0	91,7
40	95,1	90,2	91,7	92,4
50	95,2	90,2	92,4	93,0
60	95,6	91,7	93,0	93,6
75	96,0	92,4	93,0	93,6
100	96,5	93,0	93,6	94,1
125	96,5	93,0	94,5	95,0
150	96,0	93,0	94,5	95,0
200	96,8	94,1	95,0	95,4
250	97,0		95,4	95,4
300	97,1		95,4	95,4
350	97,2		95,4	95,4
400	97,2		95,4	95,4
450	97,6		95,4	95,4
500	97,6		95,4	95,4

Dari Tabel 1 dapat dilihat perbandingan hasil perancangan dengan berbagai standar yang biasa dipergunakan pada berbagai nilai kapasitas motor. Hasil perancangan menunjukkan nilai efisiensi yang lebih besar dibanding standar.

KESIMPULAN

Dari seluruh proses perancangan yang dilakukan pada motor induksi tiga fasa tipe rotor belitan dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut :

1. Kecepatan motor berbanding terbalik terhadap diameter stator, demikian pula pada celah udara terhadap panjang inti stator.
2. Torsi maksimum berbanding lurus terhadap suhu kerja.
3. Terjadi penurunan nilai rugi-rugi daya.
4. Perbandingan hasil perancangan terhadap tiga standar yaitu : NEMA, NEMA EPACT dan IEEE 841 menunjukkan peningkatan besarnya nilai efisiensi untuk berbagai nilai kapasitas.

DAFTAR PUSTAKA

- Theodore Wildi, *Electrical Machines, Drives, and power System*. Prentice-Hall International, 2000.
- Douglass. Johnny, *Induction Motor Efficiency Standards*, Washington State University Extension Energy Program, Olympia, 2005.
- Fitzgerald, A.E, *Mesin-Mesin Listrik*, Erlangga, Jakarta, 1997.
- Theraja. B.L, *A Text Book of Technology*. S. Chand & Company, New Delhi, 1984.
- Zuhal, *Prinsip Dasar Elektroteknik*, PT. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 2004.
- Upadhyay, K.G, *Conventional and Computer Aided Design*. Galgotia Publications PVT. LTD, 2002.
- NEMA Standard Publication MG-1, *Motors and Generators*, National Electrical Manufacturers Association, Washington, D.C.